

Erwin Marx und sein Beitrag zur Entwicklung der Hochspannungs-Gleichstromübertragung von 1930 bis 1945¹

DIETER KIND

Knappstraße 4, D-38116 Braunschweig

Konkrete Pläne zur Übertragung hoher elektrischer Leistungen über sehr große Entfernungen mit Gleichstrom gehen in Deutschland zurück auf die Jahre nach dem Ersten Weltkrieg. Obwohl damals schon gute Betriebserfahrungen mit 220 kV-Drehstromübertragungen über große Entfernungen vorlagen, gab es Überlegungen, die technisch-physikalischen Grenzen bei langen Freileitungen und vor allem auch bei Kabeln durch die Anwendung von Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) zu vermeiden. Einer Verwirklichung solcher Pläne aber stand damals das Fehlen von Stromrichtern für hohe Ströme und Spannungen im Wege.

Es lag also nahe, dass engagierte Ingenieure an Hochschulen und in der Industrie sich die Entwicklung von HGÜ-tauglichen Stromrichtern zum Ziel setzten. Zu ihnen gehörte Prof. Erwin Marx, der mit seinen Arbeiten an der Technischen Hochschule Braunschweig diese neue Technik insgesamt wesentlich förderte. Bei der schon erkannten wirtschafts- und auch wehrpolitischen Bedeutung einer sicheren Stromversorgung erfuhren solche Arbeiten insbesondere nach 1933 und erst recht nach Beginn des Zweiten Weltkriegs eine großzügige staatliche Unterstützung.

1. Erwin Marx, Hochschullehrer und innovativer Forscher

Erwin Marx, Jahrgang 1893, studierte von 1913 bis 1920, unterbrochen durch Militärdienst, Elektrotechnik an der Technischen Hochschule Dresden. Als Assistent von Professor Hans Görges, wurde er 1923 promoviert. Bei einer anschließenden Industrietätigkeit als Leiter eines Hochspannungsversuchsfeldes erfand er eine geniale Vervielfachungsschaltung, die heute weltweit als „Marxscher Stoßspannungsgenerator“ bezeichnet wird².

¹ Eingegangen: 24.11.2012. Erweiterung eines Beitrags zur Buchfassung der VDE-Tagung „75 Jahre Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung HGÜ“ in Berlin, 26./27. September 2011 (siehe auch elektronische Vorveröffentlichung in der Digitalen Bibliothek Braunschweig: <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00050806>)

² Patentschrift vom 12.10.1923



Bild 1: Das Hochspannungsinstitut der Technischen Hochschule Braunschweig 1929.

Am 1. Oktober 1925 wurde er mit 32 Jahren als ordentlicher Professor für elektrische Messkunde und Hochspannungstechnik an die Technische Hochschule Braunschweig berufen. Für die damals noch junge Abteilung Elektrotechnik wurde ein Neubau errichtet, der 1929 nach nur zweijähriger Bauzeit eingeweiht wurde [1, S.13–62]. Sein Kernstück, das Hochspannungsinstitut (Bild 1), entstand nach den Plänen von Marx in enger Zusammenarbeit mit dem Architekten Prof. Mühlenpfordt und galt viele Jahre als Vorbild für vergleichbare Neubauten in Deutschland [2].

Heinz Göschel, der erste Doktorand von Prof. Marx und spätere Forschungschef von Siemens, schrieb seinem Lehrer 1963 zum 70. Geburtstag:

„Die Begegnung, die ich als frischgebackener Diplomingenieur mit dem jungen Ordinarius Erwin Marx hatte, brachte mir die Erkenntnis, wie der Lehrer einer hohen Schule sein sollte... Es gab jemanden, der sich für unsere tastenden Versuche, auf wissenschaftlichem Boden bestehen und vorwärts schreiten zu können, interessierte, der uns lehrte, wie eine neue Idee in der Technik nur Eingang finden kann, wenn sie physikalisch unterbaut und schriftlich ausformuliert ist“ [3].

Die Begeisterung, die Marx an seine Schüler weitergab, ist sicher einer der Gründe dafür, dass unter seiner Leitung in knapp zwei Jahrzehnten wesentliche neue Erkenntnisse auf dem weiten Gebiet der Hochspannungstechnik gewonnen wurden.

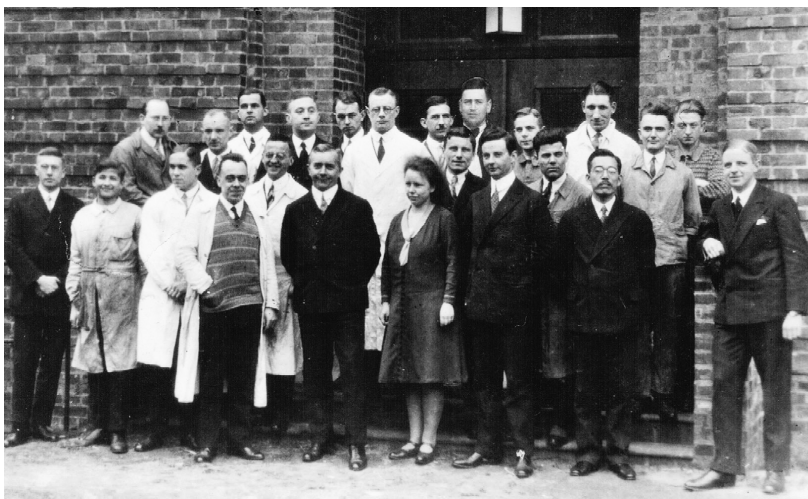


Bild 2: Prof. Marx und die Mitarbeiter des Hochspannungsinstituts 1930.

Es gelang ihm, erhebliche Drittmittel zur Durchführung von vornehmlich experimentellen Forschungsarbeiten zu beschaffen, deren Ergebnisse in zahlreichen Dissertationen wiedergegeben wurden. So erreichte das Institut schon bald eine beachtliche personelle Größe (Bild 2). Eine nach Umfang und wissenschaftlich-technischer Bedeutung besonders herausragende Arbeitsrichtung war die bis 1945 erfolgte Entwicklung des von ihm erdachten Lichtbogenstromrichters.

2. Entladungsvorgänge in Luft und Experimente mit Lichtbögen

Ausgehend von den Erfahrungen, die Marx während seiner Industrietätigkeit gemacht hatte, formulierte er 1927 in einem VDE-Vortrag seine Sicht der aktuellen Aufgaben und Ziele der Hochspannungstechnik. Er betonte dabei die Bedeutung von Untersuchungen der Durchschlagsfestigkeit von Luft für verschiedene Elektrodenanordnungen und Spannungsformen [4]. Die ersten der von ihm in den neuen Laboratorien betreuten Arbeiten widmeten sich der elektrischen Festigkeit von gasförmigen und flüssigen Dielektrika. Sie wurden von der *Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft*, der Vorgängerin der *Deutschen Forschungsgemeinschaft* (DFG) gefördert.

Bei der Beobachtung unsymmetrischer Anordnungen in Luft zeigte sich im Gegensatz zu homogenen Feldern bei allen Spannungsformen überraschend ein ausgeprägter Polaritätseffekt der Durchschlagsspannung, für den Marx ein phy-

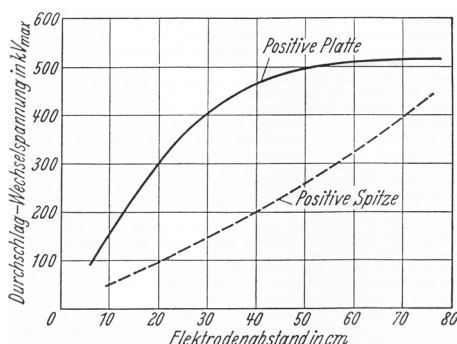


Bild 3: Durchschlagsspannung einer Spitze-Platte-Funkenstrecke bei 50 Hz. (nach H. Buchwald, Diss. 1930). Quelle: [5].

sikalisches Modell entwickelte. Von besonderem Interesse war die Beobachtung einer Spitze-Platte Anordnung bei Wechselspannung: Die Durchschlagsspannung bei positiver Spitze war wesentlich niedriger als bei negativer Spitze. Marx erkannte, dass dieser Effekt für eine Gleichrichtung von sehr hohen Wechselspannungen genutzt werden kann (Bild 3) [5, S.18].

Weitere neue Erkenntnisse erbrachten Untersuchungen des Durchschlagsverhaltens von Funkenstrecken bei Veränderung von Luftdruck und Elektrodentemperatur. Insbesondere auch bei strömender Luft, ergab sich bei unsymmetrischen Anordnungen ebenfalls ein deutlicher Polaritätseffekt (Bild 4) [5, S.23]. Dieses Ergebnis wurde an der in Bild 5 wiedergegebenen Anordnung gewonnen, bei der die von der Spitze ausgehende Entladung von einer intensiven Luftströmung umgeben war [5, S.84]. Diese Beobachtung dürfte den Anstoß zu der Idee gegeben haben, das Verhalten von stationären Entladungen unter dem Einfluss von Druckluftströmung im Hinblick auf eine Eignung für Lichtbogenstromrichter zu untersuchen.

3. Experimente zur Optimierung von Lichtbogenkammern

Die umfangreiche Liste von Veröffentlichungen aus dem Braunschweiger Hochspannungsinstitut zum Thema Lichtbogenstromrichter beginnt mit dem 1932 erschienenen Buch von Marx [5]. Dessen Aufbau ist insofern charakteristisch für die Arbeitsweise seines Verfassers, als es zwar das Entwicklungsziel „Lichtbogen-Stromrichter für sehr hohe Spannungen und Leistungen“ im Titel herausstellt, zunächst aber ausführlich die wissenschaftlichen Grundlagen behandelt. Dabei werden nicht nur die in wenigen Jahren unter seiner Leitung von Mitarbeitern gewonnenen Arbeiten, sondern auch der Stand des Wissens über die Physik elektrischer Entladungen ausführlich beschrieben.

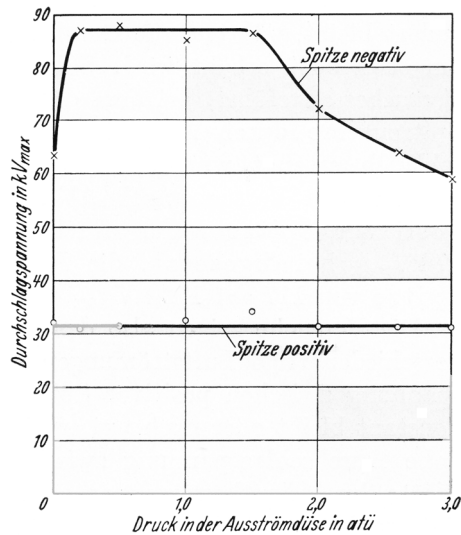


Bild 4: Durchschlagsspannung einer Spitze-Platte-Funkenstrecke mit Luftströmung nach Bild 5 bei 50 Hz (nach W. Ziegenbein, Diss. 1931). Quelle: [5].

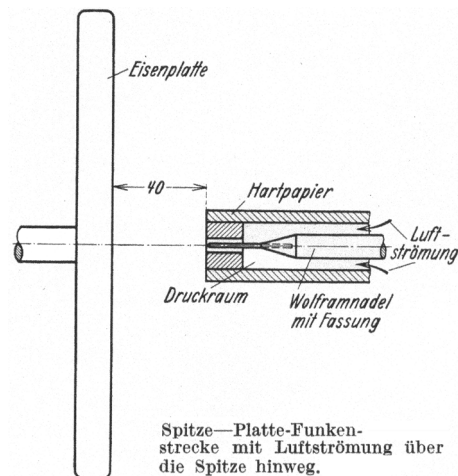


Bild 5: Spitze-Platte-Anordnung mit Luftströmung in Feldrichtung an der Spitze. Elektrodenabstand 40 mm. Quelle: [5].

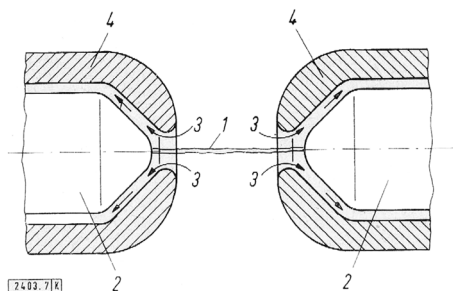


Bild 6: Haupt- und Schirmelektroden Prinzip des Lichtbogenstromrichters nach Marx. Legende im Text [2].

Bei Experimenten zur Untersuchung der elektrischen Festigkeit von Isolierungen bilden sich nach einem vollkommenen Durchschlag nur dann Lichtbogenentladungen aus, wenn die Spannungsquelle bei positiver Strom-Spannungs-Charakteristik den für die Bildung eines Plasmakanals ausreichend hohen Strom liefert. In Starkstromkreisen ist daher beim Öffnen von Schaltern sowie nach einem Durchschlag von Isolierungen immer mit Lichtbögen zu rechnen.

In Lichtbogen-Stromrichtern muss der Stromkreis durch die Zündung einer elektrischen Entladung periodisch geschlossen und anschließend wieder unterbrochen werden. Erfahrungen mit der in Bild 5 gezeigten Anordnung legten es nahe, die Löschung des Lichtbogens durch eine starke Luftströmung zu erzwingen und anschließend eine rasche Wiederverfestigung der Strecke zu erreichen.

Die weiteren Braunschweiger Forschungsarbeiten waren daher ganz auf diese Aufgabe ausgerichtet.

Das Prinzip der nach diesen Überlegungen entwickelten Lichtbogenkammer mit Ausströmöffnungen an jeder Elektrode zeigt Bild 6: Der Lichtbogen 1 wird durch einen Zündimpuls im Takt der Wechselspannung zwischen den Hauptelektroden eingeleitet. Er wird von einer schnellen Luftströmung 3 innerhalb der in den Hauptelektroden 2 eingelassenen Düsen umgeben, wodurch die Entladung räumlich stabilisiert wird. Aufgabe der Schirmelektrode 4 ist die optimale Führung der Gasströmung sowie die zur Verringerung des Abbrands der Hauptelektroden erforderliche Abschirmung der Lichtbogenfußpunkte. Trotz stellenweise intensiver Kühlung des Bogens bleibt die Lichtbogenspannung niedrig und ermöglicht eine sichere periodische Löschung. Die Gleichrichtwirkung kommt dadurch zustande, dass der Lichtbogen nur in jeder zweiten Halbschwingung eingeleitet und wieder gelöscht wird [2].

Bild 7 ist ein Schnittbild, Bild 8 ein Foto der Apparatur, mit der nach 1934 in einer Reihe von weiteren Arbeiten schrittweise eine Verbesserung der für Lichtbogenkammern erwünschten Eigenschaften erreicht wurde [5].

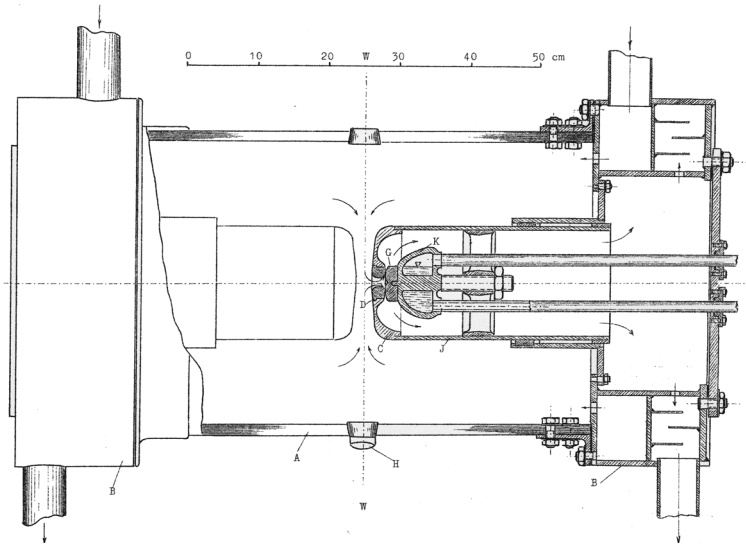


Bild 7: Schnittbild einer Lichtbogenkammer mit düsenförmiger Auslaufströmung an den Hauptelektroden G, C, D = Schirmelektroden, Ausgelegt für 200 kV, 200 A. Quelle: [6].

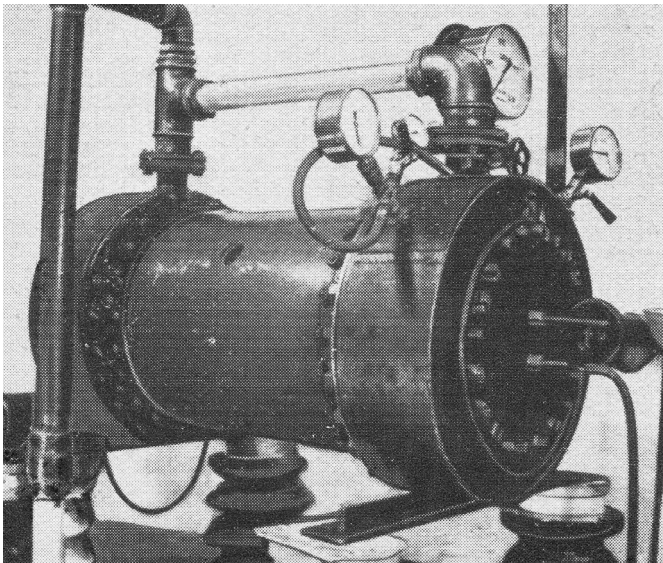


Bild 8: Foto der Versuchsanordnung mit Lichtbogenkammer nach Bild 6 Quelle: [6].

Das Ziel der Untersuchungen war es, den Einfluss der Form von Schirm- und Hauptelektroden sowie der Luftströmung auf Lichtbogenverluste und Sperrfähigkeit der Strecke zu ermitteln. Lichtbogenkammern dieser Art zeigten Ergebnisse, die die Hoffnung auf das Erreichen günstiger Eigenschaften in Konkurrenz zu den Entwicklungsarbeiten der Industrie an Quecksilberdampf-Ventilen förderten. Ein wichtiges Ergebnis war unter anderem die Erkenntnis, „dass die Mittel zur Lichtbogenlöschung erst kurz vor dem Nulldurchgang des Stroms, der ja durch die Schaltung erzwungen wird, wirksam werden“ dürfen, um den Wirkungsgrad der Umformung nicht zu verschlechtern [5, S.106].

4. Die Entwicklung von Lichtbogenstromrichtern³

Ermutigt durch staatliches Interesse an Fortschritten bei der Übertragung elektrischer Energie über große Entfernungen begannen auch Unternehmen der Elektroindustrie sich mit der Entwicklung von HGÜ-tauglichen Stromrichtern zu befassen. Während die AEG sich zunächst an den Braunschweiger Arbeiten beteiligte, konzentrierten sich andere Firmen auf die Weiterentwicklung von Quecksilberdampf-Ventilen. Natürlich erkannte auch Marx trotz aller Überzeugung von seiner Idee, dass es konkurrierende Entwicklungslinien gab. So schrieb er bereits 1932: *„Inwieweit die Lichtbogen-Ventile wegen ihrer Einfachheit, Widerstandsfähigkeit und wegen ihres geringen Gewichtes bei niedrigeren Spannungen die Quecksilberdampf-Gefäße ersetzen werden, muss die Zukunft zeigen“* [5, S.155].

Die Weiterentwicklung von Lichtbogenstromrichtern für die HGÜ erforderte 1935 jedoch einen erheblich größeren finanziellen Aufwand, um in Leistungsprüfanlagen sowie in Probeübertragungen die Tauglichkeit zu bestätigen. Mit der Bewilligung der erforderlichen Mittel erreichte Marx die Erfüllung materieller Voraussetzungen für die weiteren Arbeiten. Neben der AEG und der DFG beteiligte sich insbesondere auch das Reichsluftfahrtministerium (RLM) an der Finanzierung. Im Zuge der „Wehrhaftmachung“ der Elektrizitätswirtschaft sollte die nur bei Gleichspannung mögliche Verkabelung von Hochspannungsfreileitungen vor Luftangriffen schützen [7, S.266, S.311].

Eine neue Ersatzprüfschaltung mit zwei getrennten Stromquellen für den abzuschaltenden Strom und die wiederkehrende Spannung erfüllte die Voraussetzung für weitere Entwicklungen zu Stromrichtern mit höheren Leistungen [8]. Noch

3 Auf der Grundlage eines ausführlichen Quellenstudiums hat Helmut Maier in seiner 1993 als Monografie erschienenen Dissertation die durch viele Forschungsarbeiten und deren technische Umsetzung vollzogenen Entwicklungsschritte ausführlich beschrieben [7]. Darüber hinaus untersucht und bewertet er den durch die NS-Politik bestimmten politisch-ökonomischen Kontext.

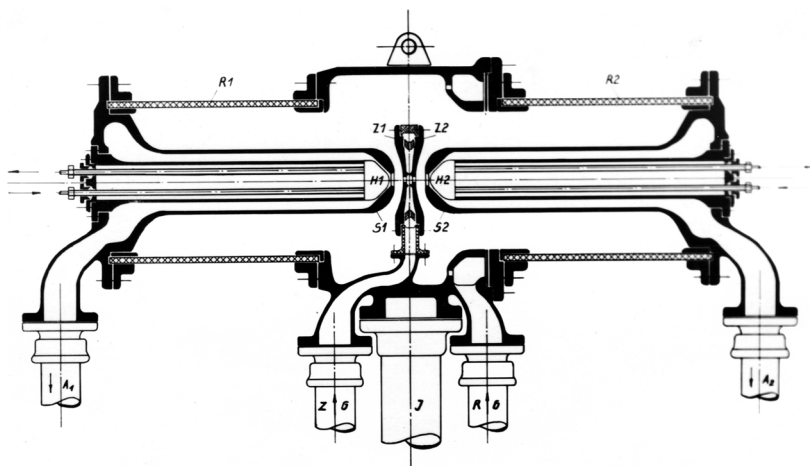


Bild 9: Lichtbogenkammer mit 2 Teilstrecken („Zwillingsventil“). Legende im Text. Quelle: [11], [9], [13].

immer aber konnte das Kernproblem des Abbrands der Elektroden und damit des eingeschränkten Dauerbetriebs nicht überzeugend gelöst werden. Diese Bedenken veranlassten offenbar den Industriepartner AEG im Jahre 1937, die Entwicklung von Quecksilberdampf-Stromrichtern selbst wieder aufzunehmen.

Schaltversuche mit einer in Bild 9 gezeigten neuen Konstruktion der Lichtbogenkammer hatten inzwischen zu deutlich verbesserten Ergebnissen geführt [9,10]. Durch die Anordnung der mit einem eigenen Luftstrom betriebenen Zündelektroden Z, die zwischen den Hauptelektroden H angeordnet waren, entstand eine Reihenschaltung von zwei Teilstrecken. Zusammen mit den Schirmelektroden S ergaben sich gute Strömungsbedingungen für die Löschung des Hauptlichtbogens und die anschließende Wiederverfestigung der Strecke. Das für die Zündelektroden erforderliche „Radialgas“ RG wurde über den die Kammer tragenden Isolator, der Hauptgasstrom A über die Endflansche parallel zu den Stromanschlüssen geleitet. Die Aufteilung des Lichtbogens in zwei Teilstrecken erbrachte insbesondere bei der Rückzündungsfestigkeit eine erhebliche Verbesserung [11].

Ein großer Erfolg für die Bemühungen um den Nachweis der praktischen Einsatzmöglichkeiten der Lichtbogenstromrichter war die Genehmigung der Reichswerke „Hermann Göring“ (HGW), auf ihrem Gelände in Hallendorf bei Watenstedt Versuche an der 100 kV- Sammelschiene durchzuführen, wo die erforderlichen Energiemengen zur Verfügung standen [7, S.182]. Der Bau begann im Oktober 1940. Auf dem Gelände, das neben der Umspannstation Hallendorf lag, wurden ein Stromrichter- und ein Gebläsehaus sowie ein Freiluftschaltfeld und die erforderlichen Vor- und Belastungswiderstände errichtet. Währenddessen gingen

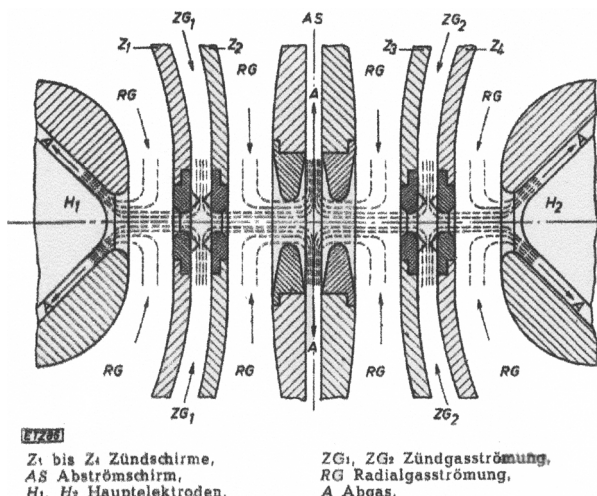


Bild 10: Lichtbogenkammer mit 4 Teilstrecken. Ausgelegt für 400 kV, 600 A. Quelle: [12].

Neubau und Erprobung von Ventilen sowie der Aufbau von Versuchsanlagen im Hochspannungsinstitut weiter [7, S.185].

Das Prinzip, den Hauptlichtbogen durch die Reihenschaltung von mehreren Teilstrecken zu unterteilen, hat sich nach in den Jahren 1941 bis 1943 durchgeführten Versuchen mit Leistungen bis 15 MW und 75 kV Gleichspannung als erfolgreich bewiesen. Bild 10 zeigt die für 400 kV und 600 A entwickelte Lichtbogenkammer mit vier Teilstrecken [12]. Dieser Aufbau bedeutete aber auch eine weitere Steigerung des Aufwandes für Konstruktion, Fertigung und Betrieb. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Reihenschaltung zu einer Erhöhung der Betriebssicherheit führte, da bei dem Ausfall einer Teilstrecke die Übertragung insgesamt störungsfrei weiter betrieben werden konnte. Das entwickelte Hochdruck-Lichtbogenventil erreichte die für eine HGÜ erforderliche zuverlässige Löschung zu einem genau bestimmaren definierten Zeitpunkt.

Wesentliche Nachteile der Lichtbogenstromrichter gegenüber Quecksilberdampf-Ventilen blieben allerdings der durch den Stromverbrauch der Druckluftpumpen schlechtere Wirkungsgrad und vor allem der die Betriebsdauer einschränkende Abbrand der Hauptelektroden.

Im Hinblick auf die „schon vielfach erörterte elektrische Kraftübertragung Norwegen-Deutschland“, hatte Marx bereits im August 1940 einen Antrag zur Bewilligung von Mitteln zur Errichtung einer leistungsstarken Großversuchsanlage unter Einbeziehung des 220 kV-Netzes der HGW gestellt [7, S. 199]. Auf der

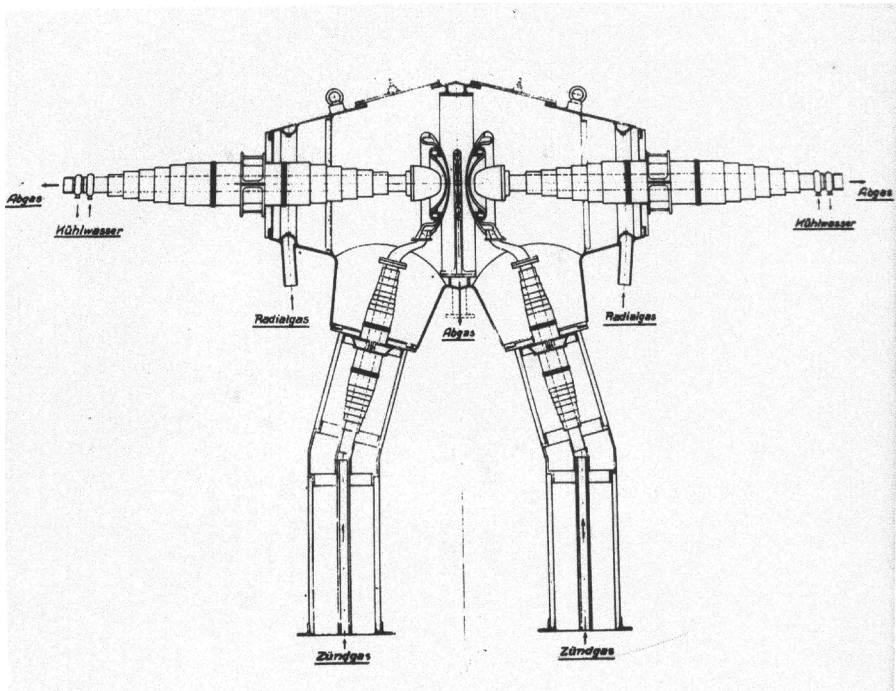


Bild 11: Schnittbild eines Lichtbogenstromrichters mit dem in Bild 10 gezeigten Hochdruckventil (Bauhöhe etwa 3 m).

Grundlage der schließlich erreichten Verbesserungen bewilligte das Reichsamt für Wirtschaftsausbau (RWA) 1942 Mittel für die Entwicklung neuer Ventile, die für eine Dauerversuchsanlage mit Gleich- und Wechselrichterstationen im 220 kV-Netz vorgesehen waren (Bild 11). Nahe der Umspannstation Hallendorf wurden für die „220 kV-Versuchsanlage Hallendorf“ wieder ein Stromrichter- und ein Gebläsehaus sowie ein Freiluftschaltfeld und die Vor- und Belastungswiderstände errichtet.

1943 musste das Projekt „Hallendorf-Lehrte“ wegen des Mangels an Arbeitskräften jedoch auf die Aufstellung von Gleich- und Wechselrichtern in der Versuchsanlage Hallendorf mit je 3 Ventilen reduziert werden. Diese sollten über eine vorhandene 45 km lange 220 kV-Leitung von Hallendorf nach Lehrte im Kreisbetrieb mit 300 kV Gleichspannung betrieben werden [7, S.201]. Infolge der völligen Überlastung der Elektroindustrie mussten wichtige Komponenten bei Schweizer Firmen bestellt werden [7, S.203]. Obwohl die Anlage „Hallendorf-Lehrte“ nahezu einschaltbereit war, hat sie ihre für Mai 1945 geplante Inbetrieb-

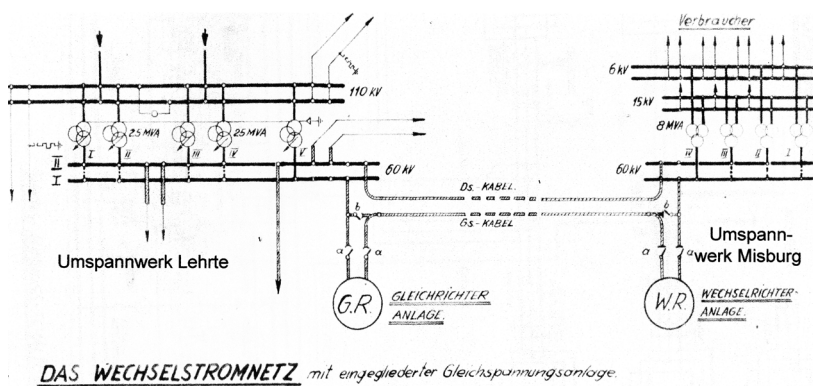


Bild 12: Schaltbild der HG -Versuchsstrecke Lehrte-Misburg 1943 [9].

nahme nicht erlebt und ist auch nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs nicht mehr weiter betrieben worden.

5. Lehrte-Misburg, die erste HGÜ-Versuchsanlage über 10 MW im Netz

Zuverlässige Stromrichter für hohe Spannungen und Übertragungsleistungen sind zwar eine notwendige aber keine hinreichende Voraussetzung für eine HGÜ. Zum Studium aller bei einer vollständigen Anlage auftretenden Teilprobleme hatte Marx bereits im Juli 1940 finanzielle Mittel für die Errichtung einer vollständigen HGÜ-Versuchsanlage in einem Mittelspannungsnetz beantragt. In seinem Antrag an das RWA heißt es:

Bevor an den Bau einer Großanlage herangegangen werden könne, müssten die Ventile mit ihren Zündanlagen, die Gebläse, Kühler und Filter im langen Dauerbetrieb erprobt werden. Überdies sollten Erfahrungen über die Zündsteuereinrichtung, Sicherheitsmaßnahmen, Gaszusammensetzung, Korrosionserscheinungen, Elektrodenabbrand und den Einsatz des Blindleistungs-Stromrichters gesammelt werden [7, S.191].

Die Preußenelektra plante zu dieser Zeit die Verlegung eines zweiten 60 kV-Kabels parallel zu einem vorhandenen zwischen den östlich von Hannover gelegenen Umspannstationen Lehrte und Misburg. Es wurde vereinbart, dass dieses parallel liegende Kabel für die von Marx geplante HGÜ-Versuchsanlage verwendet werden sollte. Eine ausführliche Dokumentation über den Aufbau und den Betrieb der Anlage sowie über die in den Jahren 1942 bis 1944 durchgeführten Versuche

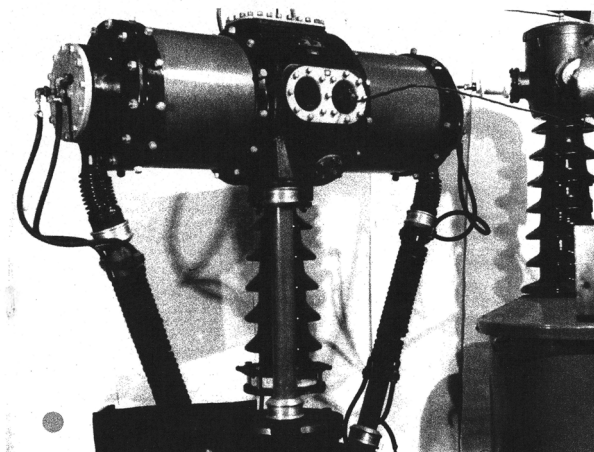


Bild 13: Lichtbogenstromrichter mit Zündtransformator für Versuche zur Betriebssicherheit.

und deren Ergebnisse verdanken wir der umfangreichen Dissertation von Adil Erk, aus der viele der nachfolgenden Informationen gewonnen wurden [9,10].

Bild 12 zeigt die 110/60 kV-Umspannwerke mit den beiden 5 km langen 60 kV-Kabelstrecken, von denen eines durch Zwischenschaltung von Stromrichtern als Gleichstromkabel mit 75 kV und etwa 12 MW Übertragungsleistung betrieben werden sollte. Die Gleich- und Wechselrichter wurden mit je sechs für 100 kV und 200 A Gleichstrom bemessenen Hochdruck-Lichtbogen-Ventilen aufgebaut (Bild 13) [9]. Zum Schutz gegen Rückwirkungen von Betriebsstörungen in den Stromrichtern auf die Stromversorgung im Drehstromnetz mussten zusätzliche Einrichtungen eingebaut werden, deren Bereitstellung wiederholte Verschiebungen der Inbetriebnahme zur Folge hatten (Bild 14).

Obwohl dank der guten Zusammenarbeit mit der Preussenelektra die geplanten HGÜ-Versuche im Megawattbereich überhaupt erst möglich wurden, bedeutete die geforderte unbedingt zuverlässige Stromversorgung des Umspannwerks Misburg erhebliche Einschränkungen bei der Versuchsdurchführung. Das erkennt man auch an den Tageszeiten der von 1 bis zu 6 Stunden durchgeführten Dauerversuche, die meist nachts stattfanden.

Bei den Versuchen im Dauerbetrieb traten gemäß dem Charakter der Anlage als Probebetrieb zahlreiche Probleme auf. Es wurde im Durchschnitt eine Leistung von 6 bis 7 MW, im Höchstfall 12 MW übertragen. Betriebsprobleme an den Ventilen selbst ließen sich durch Erhöhung des Druckes und der Zündgasge-

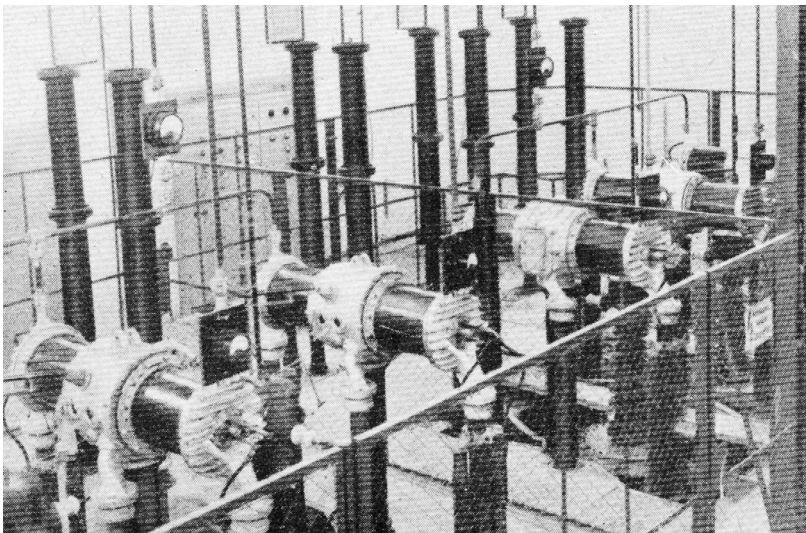


Bild 14: Ventilhalle der HGÜ-Versuchsanlage Lehrte-Misburg 1943 Quelle: [10].

schwindigkeit beseitigen. Bis Juni 1944 entwickelte sich der Versuchsbetrieb in der Art, dass von täglichen stundenweisen Versuchen auf Dauerversuche von 2–3 Tagen übergegangen wurde [7, S. 198].

Am 18. Juni 1944 wurde das Umspannwerk Misburg durch Bombentreffer schwer beschädigt, eine Wiederaufnahme des Versuchsbetriebs kam nicht infrage. Die nüchternen Worte, die Erk in seiner 1945 geschriebenen Dissertation für diese Situation fand, lassen die äußeren Umstände nur erahnen: „Der geplante längere ununterbrochene Dauerbetrieb konnte leider infolge von Kriegseignissen nicht durchgeführt werden“ [9].

Obwohl der Betrieb der HGÜ-Versuchsanlage „Lehrte-Misburg“ vor Abschluss der geplanten Untersuchungen abrupt abgebrochen werden musste, darf man zu Recht das ganze Vorhaben als einen Meilenstein der HGÜ-Technik ansehen.

6. Zusammenfassung und Rückschau

Eine wirtschaftliche, sichere und umweltschonende Stromversorgung ist nicht erst seit heute eine für eine Industriegesellschaft wichtige Aufgabe. Sich ihr unabhängig von politischen Verhältnissen zu widmen, stellt eine Herausforderung für Wissenschaftler und Ingenieure dar.

Die Begeisterung für die Mitarbeit an der Entwicklung der HGÜ war sicher eine wesentliche Triebfeder für leitende Ingenieure in Wissenschaft und Industrie. Bei Prof. Marx kam hinzu, dass er durch persönliches Engagement und Verhandlungsgeschick die Bewilligung von aufwendigen Forschungsprojekten erreichen konnte, deren „Kriegswichtigkeit“ auch ihm zweifelhaft gewesen sein dürfte. Einer seiner späteren Doktoranden stellte fest: *„Marx war zeitlebens ein Pragmatiker, der seine Ziele mit Hartnäckigkeit verfolgte. Dabei verfügte er über eine beachtliche Eloquenz und eine beeindruckende Überzeugungskraft“* [14].

Während des Zweiten Weltkriegs wurde neben der Entwicklung der Marxschen Lichtbogenstromrichter auch die von der Industrie betriebene Entwicklung von Quecksilberdampf-Stromrichtern durch staatliche Stellen massiv gefördert. Dies geschah in der irrealen Annahme, die HGÜ-Technik könnte kurzfristig wegen der Möglichkeit einer Kabelverlegung von Freileitungen von militärischer Bedeutung sein. Maßnahmen der Förderung waren nicht nur die Bewilligung großer finanzieller Mittel, sondern auch die vorrangige Bereitstellung industrieller Produkte und nicht zuletzt die Befreiung hervorragender Ingenieure vom Wehrdienst.

Die Lichtbogenstromrichter nach Prof. Marx haben sich in nur 15 Jahren aus Grundlagenuntersuchungen zu bemerkenswerten Hochleistungsschaltgeräten entwickelt. Ihr physikalisches Wirkungsprinzip wurde auch für andere Anwendungen, insbesondere für Leistungsschalter, richtungweisend. Die auf Grund ihres Aufbaus erwartete Eignung für hohe Übertragungsleistungen erneuerte jedenfalls in den 1930er Jahren das Interesse an Gleichstromübertragungen über große Entfernungen, darunter vor allem Planungen zur Nutzung Norwegischer Wasserkrafts über HGÜ zur Deckung des Strombedarfs von Deutschland [7, S.70].

Merkmale für die Entwicklungen von Prof. Marx und Mitarbeitern waren umfangreiche zielgerichtete experimentelle Untersuchungen, die schrittweise zu Verbesserungen führten. Sie waren anstelle der damals noch nicht verfügbaren theoretischen Hilfsmittel von intuitivem Verständnis der physikalischen Prozesse in Lichtbogenentladungen gekennzeichnet.

Bei Kriegsende standen sowohl die Marxschen Lichtbogenstromrichter als auch die Quecksilberdampf-Stromrichter vor weiteren Versuchen, die jede der beiden Arbeitsgruppen als aussichtsreich bewertete [10]. Während die Braunschweiger Arbeiten als Folge des politischen Zusammenbruchs endgültig abgebrochen werden mussten, bestanden die von den Firmen AEG und Siemens für „Elbe-Berlin“ entwickelten Quecksilberdampf-Stromrichter schließlich 1950 ihre Bewährungsprobe in der HGÜ „Kashira-Moskau“. Hier wurde erstmals die Übertragungsleistung von „Lehrte Misburg“ übertroffen. Damit war der „Konkurrenzkampf“ zwischen beiden Ventillösungen eindeutig zugunsten der Quecksilberdampf-Ventile entschieden, bis diese etwa 30 Jahre später wiederum von der Halbleitertechnik abgelöst wurden.



Bild 15: Erwin Marx, 1893–1980, ein Pionier der Hochspannungs- Gleichstromübertragung (Foto 1973)

Die Braunschweiger Arbeitsgruppe wurde 1945 aufgelöst, die zum Teil sehr großen Versuchsgeräte wurden später verschrottet. Wegen der verordneten strengen Geheimhaltung der Arbeiten erschienen Veröffentlichungen über die Braunschweiger Entwicklungsergebnisse erst nach Kriegsende (z.B. [7], [10] und [13]).

Prof. Marx konnte aus politischen Gründen – „*er war mit Sicherheit kein Gegner des Nationalsozialismus*“ [14] - seine Aufgabe als Leiter des Hochspannungsinstituts zunächst nicht weiterführen, wurde jedoch 1948 wieder „ohne weitere Beschränkungen eingereiht“ [15]. Er setzte sich bis zu seiner Emeritierung 1962 weiterhin für die HGÜ-Technik ein. 1966 wurde ihm der VDE-Ehrenring „in Anerkennung seiner grundlegenden Arbeiten auf den Gebieten der Stromrichter- und Schaltertechnik und der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung“ verliehen. Das Foto Bild 15 zeigt ihn bei einer Veranstaltung aus Anlass seines 80. Geburtstags im traditionellen Hörsaal des Braunschweiger Hochspannungsinstituts.

Der Verfasser dankt Prof. Dr.-Ing. Jürgen Salge, Braunschweig, sowie Prof. Dr. rer.nat. Helmut Maier, Bochum, für hilfreiche Anmerkungen zum Manuskript.

Literatur

- [1] MARX, E.: Das Institut für elektrische Messkunde und Hochspannungstechnik der TH-Braunschweig, Festschrift 1929, S. 13–62.
- [2] ERK, A. & A. KIND: Forschung und Entwicklung am Hochspannungsinstitut der Technischen Hochschule Braunschweig, ETZ-A 84 (1963), H.4, S. 99–107.
- [3] GÖSCHEL, H.: Dem Lehrer und Forscher Erwin Marx zum 70. Geburtstag. ETZ-A 84 (1963) H.4, S. 97.
- [4] MARX, E.: Der elektrische Durchschlag von Luft im inhomogenen Felde. Arbeiten aus dem Hochspannungsinstitut der TH-BS, Bd.I, 1931, S.41–50.
- [5] MARX, E.: Lichtbogen-Stromrichter für sehr hohe Spannungen und Leistungen. Springer-Verlag 1932.
- [6] MEYER, H.W.: Die Sperrspannung des Marxschen Lichtbogenstromrichters neuer Bauart. Diss. TH-BS 1934.
- [7] MAIER, H.: Erwin Marx (1893–1980), Ingenieurwissenschaftler in Braunschweig, und die Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der elektrischen Energieübertragung auf weite Entfernungen zwischen 1918 und 1950. GNT-Verlag Stuttgart 1993.
- [8] MARX, E.: Eine Ersatzschaltung für die Prüfung von Hochleistungsventilen und Hochleistungsschaltern. ETZ Jg. 57 (1936), S.583–586.
- [9] ERK, A.: Untersuchung einer Gleichstrom -Übertragungsanlage für 80 kV und 16000 kW mit Hochdruck-Lichtbogenventilen. Diss. TH-BS 1946.
- [10] ERK, A.: Versuchsanlagen für die Gleichstrom-Hochspannungs-Übertragung unter Verwendung von Hochdruck-Lichtbogenventilen nach Marx. Bull. SEV 38 (1947), Nr.11, S. 295–308.
- [11] TRAUPE, W.-H.: Lichtbogenlöschung mit strömendem Gas. Diss. TH-BS 1938.
- [12] TOLAZZI, H.: 15 MW-Drehstrom-Gleichrichteranlage für 75 kV Gleichspannung mit Hochdrucklichtbogenventilen. Diss. TH-BS 1946 (s. auch ETZ Jg.70 (1949), S. 334–337).
- [13] BAUDISCH, K.: Energieübertragung mit Gleichstrom hoher Spannung. Springer-Verlag 1950.
- [14] SCHÜTTE, H.: Kritische Betrachtungen zu einer Aufarbeitung von Technikgeschichte. Mitt. tech.-wiss. Vereine, No.3 1992, S.8–9.
- [15] WESSELHÖFT, D.: Von fleißigen Mitmachern, Aktivisten und Tätern. Georg Olms Verlag 2012.

Anmerkung: Bilder ohne Quellenangabe sind dem Archiv des Hochspannungsinstituts entnommen.